

**Vergleichende Messungen des Atemminutenvolumens
an drei verschiedenen Systemen der Ergospirometrie
und die Möglichkeiten zur Korrektur
unterschiedlicher Meßwerte**

von

Hiltraud Rosenbauer

aus

Nürnberg

1971

Aus der Medizinischen Poliklinik
der Universität Erlangen-Nürnberg
Direktor: Professor Dr. med. C. Korth

**Vergleichende Messungen des Atemminutenvolumens
an drei verschiedenen Systemen der Ergospirometrie
und die Möglichkeiten zur Korrektur
unterschiedlicher Meßwerte**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt
von
Hiltraud Rosenbauer
aus
Nürnberg



Dekan: Prof. Dr. W. Schiefer

Referent: Prof. Dr. J. Schmidt

Korreferent: Prof. Dr. C. Korth

Tag der mündlichen Prüfung: 4.5.1971

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
A. ZUSAMMENFASSUNG	1 - 8
B. EINLEITUNG	9
C. PROBLEMSTELLUNG	10
D. METHODIK	11 - 24
I. Verwendete Systeme der Ergospirometrie	11
1. Geschlossenes System	11
2. Offenes System	11 - 13
3. Ventilgesteuertes System	14
II. Versuchsanordnung	14 - 15
III. Auswertungsmethoden	16
IV. Belastungsstufen	17
V. Allgemeine Versuchsbedingungen	18
VI. Systemspezifischer Versuchsablauf	18 - 20
1. Geschlossenes System	18
2. Offenes System	19
3. Ventilgesteuertes System	19
VII. Schwellenwerte des AMV	20
VIII. Differenzquotientenbestimmung	21
IX. Korrekturen der Meßergebnisse	22 - 23
1. Schwellenkorrektur	22
2. Zeitverspätungskorrektur	22

	Seite
E. VERSUCHSERGEBNISSE	24 - 37
I. Objektive Meßergebnisse	24 - 36
1. Unkorrigierte Meßergebnisse	24
a) Meßreihe I	24
b) Meßreihe II	25
c) Meßreihe III	26 - 27
d) Schwellen	28 - 29
e) Differenzquotientenkurven	30 - 32
2. Korrigierte Meßergebnisse	32
a) Schwellenkorrektur	32 - 33
b) Zeitverspätungskorrektur	34 - 35
II. Subjektive Meßergebnisse	36 - 37
F. Vergleichende Übersicht der Relativwerte der Meßreihen I, II und III	38 - 39
G. Weitere Korrekturmöglichkeit beim OS	40 - 41
H. DISKUSSION	42 - 52
I. LITERATUR	53 - 54
K. LEBENS LAUF	55

A. ZUSAMMENFASSUNG

- I. Forderungen an ergospirometrische Meßreihen bei der Bestimmung des Atemminutenvolumens zum Zweck der Vergleichsfähigkeit von Ergebnissen unterschiedlicher ergospirometrischer Systeme.

Auf Grund der Meßergebnisse der vorliegenden Arbeit an drei verschiedenen Systemen der Ergospirometrie (offen, geschlossen, ventilgesteuert) lassen sich Faktoren ermitteln, die eine eindeutige und unverfälschte Reproduktion von Atemminutenvolumenbestimmungen während Belastung bis 150 Watt unabhängig vom verwendeten System garantieren.

Nach unseren Ergebnissen müssen für die objektive Vergleichsmöglichkeit identischer Meßreihen an unterschiedlichen Ergospirometern demnach folgende Bedingungen gestellt werden:

1. Voratmung

Vor Beginn der Belastungsmessung muß eine Ruheatmung des Probanden am angeschlossenen jeweiligen Gerät erfolgen. Sinn dieser Ruheatmung ist das Auffinden der systemspezifischen Schwelle durch Mittelung der Minutenwerte des Atemminutenvolumens in Ruhe.

Die Mindestdauer der Voratmung vor Belastung soll 5 Minuten betragen. Für eine exakte Ermittlung der Ruheschwelle ist nach unseren Erfahrungen eine Voratmungsdauer von 15 Minuten zu fordern.

2. Leistungsphase

Es handelt sich hierbei um diejenige Zeitspanne, in der der Proband einer körperlichen Belastung gleichbleibender oder sich ändernder

der Intensität ausgesetzt, und dabei gleichzeitig mit einem Ergospirometer verbunden ist. Dauer und Intensität der Belastung sind vom Versuchsleiter von Fall zu Fall für die geforderte Problematik des Versuches zu erstellen.

3. Nachatmung

Nach Beendigung der körperlichen Belastung des Probanden sollte über eine bestimmte Zeit die Phase der nachfolgenden körperlichen Ruhe registriert werden.

Sinn dieser Maßnahme ist die Ermittlung der Systemschwelle nach Beendigung der Belastung. Weiterhin ist in der Nachatmungsphase deutlich der Abgleich der während der Arbeitsphase eingegangenen Volumenschuld zu ermitteln.

Die Dauer der Nachatmung bis zum Erreichen der Nachatmungsschwelle ist von der vorangegangenen Belastung abhängig. Die Zeitdauer der Nachatmung für die Ermittlung der Nachatmungsschwelle kann mit dem unten angegebenen Verfahren der Differenzquotientenbildung bereits während des Versuchsablaufes bestimmt werden.

II. Ableitung von Faktoren, die eine Vergleichsmöglichkeit von Ergebnissen unterschiedlicher ergospirometrischer Systeme zulassen.

Aus den oben angeführten drei Forderungen an ergospirometrische Versuchsreihen lassen sich nun folgende Faktoren, die zum Vergleich verschiedener Systeme und zur Objektivierung von Meßwerten der Atemminutenvolumina unbedingt erforderlich sind, ableiten:

1. Schwellen

Als Schwellen bei ergospirometrischen Untersuchungen wollen wir die Mittelwerte der Atemminutenvolumina zu bestimmten Zeiten des Meßablaufes bezeichnen.

a) Voratmungsschwelle

Die Voratmungsschwelle läßt sich auch als Ruheschwelle bezeichnen und ist der Mittelwert der Atemminutenvolumina der Voratmungsphase.

b) Nachatmungsschwelle

Nach einer von der vorangegangenen Belastung abhängigen Zeit kehrt das Atemminutenvolumen wieder auf eine Art Ruheschwelle zurück. Wann dieser Zeitpunkt erreicht ist läßt sich durch Berechnung des Differenzquotienten bestimmen. Von diesem Punkt ab wird noch das Zeitintervall weitergeatmet, dessen Mittelwert die Nachatmungsschwelle angibt.

c) Gesamtschwelle

Sie ist das arithmetische Mittel von Vor- und Nachatmungsschwelle. Dabei ist zu beachten, daß zur Bestimmung der Vor- und Nachatmungsschwelle annähernd gleiche ZEITDAUERN Verwendung finden sollten.

Zur Erstellung der systemspezifischen und individuellen Atemminutenvolumenschwelle in Ruhe ist die Gesamtschwelle am besten geeignet.

Sollte sich bei einem der verwendeten Systeme ein systematischer Fehler der Meßapparatur zeigen, so dient die Gesamtschwelle zur Korrektur dieses Fehlers, da sie über den Meßbereich der Belastung gegensinnige Abweichungen von

Vor- und Nachatmungsschwellen ausgleicht. Die Angabe der Absolutwerte und die Art der Schwellen ist deshalb bei Berichterstattung über ergospirometrische Messungen des Atemminutenvolumens zu fordern.

2. Differenzquotient

Darunter verstehen wir den Quotienten von n-tem Minutenvolumenwert zu (n-1)-tem Minutenvolumenwert. (Z.B.: 8. Minute: 4,5 Liter, 7. Minute: 5,0 Liter, das ergibt einen Differenzquotienten von 0,9 und das entspricht 90 %).

Sowohl im Zahlenwert, der bei Ruheatmung naturgemäß um 1,0 = 100 % liegt, wie auch in der graphischen Darstellung gibt der Differenzquotient exakt an, ob die vergleichenden Systeme der Ergospirometrie mit identischer Zeitverspätung beim Leistungseinsatz arbeiten.

Tritt nämlich eine Zeitverspätung einzelner Meßfühler zum Vergleichssystem auf, so ist sie an den nach rechts oder links verschobenen Gipfeln der Differenzquotientenkurve erkenntlich. Erst dann ergibt sich die Möglichkeit der Korrektur der Testkurven nach der Zeitachse. Dabei geht man so vor, daß die Meßkurve nach Schwellenabgleich mit der Vergleichskurve in den steil aufsteigenden Schenkeln zur Deckung gebracht wird. Die Zeitverspätung kann dann an der Abszisse der Testkurve in Sekunden abgelesen werden und damit das Ausmaß der nötigen Korrektur anzeigen.

Eine Verschiebung der Gipfel der Differenzquotientenkurve gegeneinander in der Zeitachse gibt jedoch nur Aufschluß darüber, ob Zeitverspätung vorliegt, sagt jedoch nichts darüber aus, um welche Zeiteinheit verschoben ist.

Weiterhin zeigt der Differenzquotient in der Nachatmungsphase nach dem völligen Einschwenken auf die 100-Prozentlinie nach dem negativen Gipfel, der durch den Leistungsabbruch bedingt ist, an, wann der erste Teil der Nachatmungsphase beendet ist und die neue Ruhelage gefunden ist.

Das Einschwenken der Differenzquotientenkurve auf die 100%-Achse sagt jedoch nichts darüber aus, ob die Nachatmungsschwelle in den Absolutwerten gleich der Voratmungsschwelle ist.

Dies kann nur durch Mittelwertbildung aus den, dem terminalen Gipfel folgenden Nachatmungsintervallen oder aus der graphischen Darstellung der Atemminutenvolumina in Abhängigkeit von der Zeit erkannt werden.

3. Auswertung von Atemminutenvolumenwerten ergo-spirometrischer Meßreihen.

- a) Als einzig empfehlenswerte und genaue Methode hat sich die Addition der Minutenvolumenwerte innerhalb der einzelnen Belastungsstufen und während der gesamten Belastungsphase erwiesen.
- b) Als unbrauchbar für absolute Volumenvergleichsmessungen an verschiedenen Systemen der Ergospirometrie kann die Methode der Bewertung der Spitzenwerte jeweils zur letzten Minute jeder Belastungsstufe bezeichnet werden. Für die Prüfung der Stabilität einer Meßapparatur bei Atemminutenvolumenmessungen, vor allem bei größerer zeitlicher Distanz gleichartiger Meßreihen, ist diese Methode des Vergleichs von Atemminutenvolumenwerten zum Ende jeder Belastungsstufe jedoch gut anwendbar.

4. Korrekturablauf differenter Meßergebnisse identischer Versuchsreihen an unterschiedlichen Systemen der Ergospirometrie.

Schematischer Ablauf von der Ausgabe des Meßwertes am Ergospirometer bis zur schwellen- und zeitkorrigierten Kurve.

- a) Umrechnung der Meßwerte des Atemminutenvolumens auf STPD-Werte.
- b) Ermittlung von Vor-, Nachatmungs- und Gesamtschwelle jedes Systems.
- c) Berechnung der Absolutwerte der Schwellenabweichungen der Testsysteme vom Bezugssystem in Liter/Minute.
- d) Produktbildung aus systemspezifischer Schwellenabweichung vom Bezugssystem und Zeitdauer der Belastungsphase.
- e) Addition oder Subtraktion des Abweichungsproduktes der Testreihe vom STPD-Wert der Leistungsphase der Testreihe mit dem umgekehrten Vorzeichen der Abweichung.
- f) Überprüfung der Zeitverspätung mit dem Differenzquotienten.
- g) Bei Zeitverspätung des Testsystems erfolgt nun die Parallelverschiebung von Bezugs- und Testkurve der schwellenkorrigierten Absolutwertkurven des Atemminutenvolumens in Abhängigkeit von der Zeit zur Ordinate bis zur Deckung der steil aufsteigenden Schenkel zu Belastungsbeginn.
Die Absolutwerte der Zeitverspätung werden in der Abszisse abgelesen.

- h) Beträgt die Zeitverspätung der Testkurve gegenüber der Vergleichskurve mehr als 30 Sekunden, so wird die zeitverspätete Testkurve sowohl graphisch wie auch rechnerisch bei der folgenden Auswertung um einen Minutenvolumenwert nach links gerückt. Die beiden Kurven werden nun in ihrer neuen Lage als kongruent angesehen.
- Überschreitet die Zeitverspätung die bei der Auswertung im Sekundenabstand eindeutig bei 30 Sekunden liegende Grenze nicht, so wird sie in ihrer ursprünglichen Lage als kongruent mit der Vergleichskurve angesehen.
- i) Beim offenen System ist bei der Atemminutenvolumenbestimmung als weiterer Faktor für Fehlmessungen der um 140 ml vermehrte Totraum zu berücksichtigen.
- Bei Ruheatmung ist eine besondere Korrektur nicht nötig, da durch die Gesamtschwellenbeziehung dieser konstante systematische Fehler ausgeschaltet wird.
- Bei zunehmender Atemfrequenz während Belastung schleicht sich jedoch dieser Fehler wieder zunehmend ein. Er kann dadurch korrigiert werden, daß das Produkt aus mittlerer Frequenzzunahme f pro Minute, Totraumvolumen und Dauer der Belastung vom schwellen- und zeitverspätungskorrigierten Endwert des offenen Systems zusätzlich subtrahiert wird.
- k) Vergleich unserer Meßergebnisse der Atemminutenvolumenbestimmung bei offenen und geschlossenen System der Ergospirometrie mit den Ergebnissen anderer Autoren.

H. ROSKAMM u.a. berichtet in der Zeitschrift Sportarzt und Sportmedizin, Heft 3/1970, daß bei geringer Belastung die Atemminutenvolumenwerte des geschlossenen Systems (Dargatz) gering unter den Werten des offenen Systems liegen. Es bestehe die Tendenz, daß sich die Meßwerte beider Systeme bei 150 Watt Belastung bis zur Gleichheit näherten. In den höheren Belastungsbereichen zeige sich dann eine eindeutige Verschiebung zugunsten höherer Werte des geschlossenen Systems.

Bei unseren Versuchen konnten wir sowohl im Additionsverfahren wie bei Spitzenwertmessungen zu Ende jeder Belastungsstufe feststellen, daß die Atemminutenvolumenwerte des geschlossenen Systems, jedoch wesentlich ausgeprägter als bei Roskamm, unter denen des offenen Systems lagen. Dieses Verhalten änderte sich bis zur Belastung von 150 Watt grundsätzlich jedoch nicht, es bestand nur quantitativ ein relativer Abfall der höheren Werte des offenen Systems. Höhere Belastungsstufen als 150 Watt wurden jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht mehr getestet.

B. EINLEITUNG

In Sportmedizin, Arbeitsmedizin und Klinik werden heute drei verschiedene Systeme der Ergospirometrie zur Bestimmung der Atemminutenvolumina bei körperlicher Belastung verwendet: geschlossenes, offenes und ventilgesteuertes System.

Zum Vergleich verschiedener Systeme der Ergospirometrie besteht die Möglichkeit, Meßwerte gleicher Versuchsreihen nach unterschiedlichen Gesichtspunkten auszuwerten. So versucht man zum Beispiel, Spitzenwerte des Atemminutenvolumens zum Ende einer Belastungsstufe oder zu irgend einem bestimmten Zeitpunkt der Meßreihe miteinander zu vergleichen. Es besteht auch die Möglichkeit, die Additions- werte einzelner Phasen der Belastung oder der Gesamtbelastungsphase zum Vergleich heranzuziehen.

Allein aus dieser kurzen Darstellung ergibt sich bereits die Schwierigkeit der Vergleichsfähigkeit gleicher Meßreihen.

Wie H. ROSKAMM, H-G. SCHOLZ, L. SAMEK, F. LANDRY und H. WEIDEMANN in ihrer Arbeit "Über die Genauigkeit der O_2 -Aufnahme- und der Atemminutenvolumenbestimmung in einem geschlossenen System" (Sportarzt u. Sportmedizin, Heft 3/1970) zeigen konnten, ändert sich die Meßcharakteristik von geschlossenem und offenem System über eine Meßstrecke mit unterschiedlichen Belastungsstufen bei gleichbleibendem Auswertungsmodus der Ergebnisse in recht bedeutendem Ausmaß.

C. PROBLEMSTELLUNG

Ziel der vorliegenden Arbeit soll sein, ein allgemein brauchbares Verfahren zu entwickeln, das es gestattet, Meßergebnisse von Atemminutenvolumenbestimmungen bis einschließlich 150 Watt Belastung objektiv miteinander vergleichen zu können. Dabei soll keine Rolle spielen, ob diese Ergebnisse am geschlossenen, offenen oder ventilgesteuerten Ergospirometer gewonnen wurden.

Besondere Beachtung soll die Auswertung von Meßergebnissen der Atemminutenvolumina für die Vergleichsfähigkeit mit anderen Meßreihen bei gleichbleibender Versuchsanordnung erfahren. Es soll hierbei ermittelt werden, welche Auswertungsmethoden sich als optimal für die geforderte Problematik erweist.

Weiterhin soll geklärt werden, ob in den geforderten Meßbereichen geschlossenes, offenes und ventilgesteuertes System in ihren auf STPD-Bedingungen umgerechneten Ergebnissen harmonisieren.

Sollten sich Differenzen bei den drei verwendeten Systemen einstellen, so ist danach zu suchen, mit welchen Mitteln die unterschiedlichen Meßwerte lückenlos ineinander überführt werden können. Schließlich interessiert noch die Frage nach der stabilsten Meßeinrichtung der verwendeten ergospirometrischen Systeme.

D. METHODIK

I. Verwendete Systeme der Ergospirometrie

1. Geschlossenes System

Es handelt sich bei der verwendeten Apparatur um den MAGNA-TEST Typ 610 der Firma Gargatz, Hamburg.

Dieser Spirograph hat einen geschlossenen Systemkreislauf. Der Proband ist über eine Atemmaske an den Luftkreislauf des Systems angeschlossen, dessen Volumen über eine Pumpe ständig umgewälzt wird. Die Einatemungsluft entspricht in ihrer Zusammensetzung der Zimmerluft.

Ein Strömungsmesser zeigt die Ventilation, die durch eine Drosselklappe kontinuierlich geregelt werden kann, direkt an.

Die Ausatemungsluft wird in Natronkalkabsorbieren von Kohlensäure gereinigt. Die Kühlung der Absorber erfolgt durch Wasserumspülung. Eine automatische Regelvorrichtung sorgt für die Konstanterhaltung der O_2 -Konzentration in der Respirationsluft.

Ein Schreibersystem macht die Atemexkursionen an Hand der Bewegung der Spirometerglocken sichtbar.

2. Offenes System

Bei unserem Testgerät handelt es sich um den SIREGNOST FD 78 der Firma Siemens.

Der Siregnost FD 78 errechnet die statischen und dynamischen Volumina elektronisch.

Beim offenen System atmet der Proband die

umgebende Raumluft über einen Pneumotachographen.

Die Aufzeichnung der Meßwerte erfolgt durch Kompensationsschreiber.

Die fortlaufende Registrierung des Pneumotachogramms und des Atemvolumens erfolgt mit einem Gerät vom Typ Minograph.

Eine Eichung für Druck und Volumen erfolgt durch eine Eichpumpe (1000 ml) mit Sinuscharakteristik, direkt über den Pneumotachographen.

Die Atemstromwerte werden von einem Pneumomanometer, das aus einem Differential-Druckrezeptor mit Verstärker besteht, gemessen. Die Messung der Atemstromgeschwindigkeitsänderungen während der Respiration basiert auf dem Prinzip der Pneumotachographie nach Fleisch.

Die Atmung erfolgt durch einen rohrförmigen Atemstromrezeptor mit einer großen Anzahl feiner Kanäle im Lumen (Pneumotachograph nach Fleisch).

Die Kanäle garantieren innerhalb der geforderten Meßbereiche der Atemstromrezeptoren eine laminare Strömung.

Die der Strömungsgeschwindigkeit proportionale Druckdifferenz vor und hinter den Kanälen wird über zwei dünne pneumatische Leitungen dem Differentialdruckrezeptor mitgeteilt.

Nach Umformung der Druckunterschiede in elektrische Potentialdifferenzen wird das Signal verstärkt und dem Schreiber zugeleitet.

Der zeitliche Ablauf der so ermittelten Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit während der Respiration wird nach Fleisch als Pneumotachogramm bezeichnet.

Die Strömungskapillaren im Pneumotachographen werden auf 37 Grad Celsius aufgeheizt, um eine Kondensation des Wasserdampfes der Expirationsluft und damit eine Zunahme des Strömungswiderstandes zu vermeiden.

Die Berechnung der statischen und dynamischen Lungenvolumina erfolgt durch einen elektronischen Integrator, die zeitlich sich ändernden Strömungsgeschwindigkeiten der Respirationsluft werden als Atemvolumina errechnet.

Der zeitliche Ablauf der Volumenänderungen während der Respiration wird von einem Koordinatenschreiber als Spirogramm aufgezeichnet.

Die Berechnung des Atemminutenvolumens erfolgt elektronisch durch gleitende Mittelung des expiratorischen Teiles des Pneumotachogramms. Die Aufzeichnung geschieht durch einen Kompensationsschreiber.

An unserem verwendeten SIREGNOST FD 78 wurde als Änderung von der serienmäßigen Apparatur ein Ventilator angebaut, der die Aufgabe hat, die Expirationsluft sofort zu zerstreuen und damit eine Reinspiration zu verhindern.

3. Ventilgesteuertes System

Bei dem verwendeten Apparat handelt es sich ebenfalls um den SIREGNOST FD zu der Firma Siemens, nur wird anstelle des FLEISCH'SCHEN Pneumotachographen eine kleine Mund-Nasen-Maske verwendet: Die Expirationsluft gelangt durch ein Atemventil über einen Schlauch vom Mund des Patienten zu einem Mischkessel, aus dem über eine weitere Fleisch'sche Düse ein konstantes Volumen zur Gasanalyse abgesaugt wird.

Die Analyse und die Bestimmung des Atemminutenvolumens erfolgt wie beim offenen System. Das Totraumvolumen der Maske beim ventilgesteuerten System liegt unter 40 ml.

II. Versuchsanordnung

Geschlossenes, offenes und ventilgesteuertes System werden jeweils an Meßreihen mit gleichem Versuchsaufbau getestet.

Dabei geht man so vor, daß man die Probanden wahllos in drei Gruppen einteilt und dann jede der Gruppen mit einem anderen System beginnen läßt.

Nach jedem Versuch werden dann die Gruppen an den beiden anderen Systemen eingesetzt.

Dabei wird jeder Proband an jedem System gleichoft eingesetzt.

Da sich für unsere Zielsetzung der Versuchsaufbau ständig änderte, testeten wir drei große Meßreihen, die im folgenden stets als Meßreihe I, II und III angesprochen werden und wie folgt aufgebaut sind:

1. Meßreihe I

Es wurden die Atemminutenvolumina von der ersten bis zur letzten Minute der Belastung registriert.

2. Meßreihe II

Es wurden die Atemminutenvolumina von der ersten bis zur letzten Minute der Belastung registriert. Weiterhin wurden die Probanden nach Belastungsende noch 10 Minuten an die Ergospirometer gekoppelt und die Nachatmungswerte aufgezeichnet.

3. Meßreihe III

Hierbei handelt es sich um die ausführlichste Meßreihe, mit deren Hilfe allein die von uns vorgeschlagenen Korrekturen nach Schwelle und Zeitverspätung möglich wurden.

Wir werden uns aus diesem Grund bei den später folgenden Ausführungen auch immer auf diese Meßreihe beschränken.

Der Versuchsaufbau war folgender:

Die Probanden wurden für 15 Minuten ohne körperliche Belastung an die Ergospirometer angeschlossen. Dann erfolgte die Belastungsphase mit Belastung von 100, 125 und 150 Watt jeweils 6 Minuten lang. Nach Beendigung der Belastung verblieben die Probanden noch für weitere 27 Minuten an die Ergospirometer gekoppelt (Nachatmungsphase).

III. Auswertungsmethode

Sämtliche Meßwerte des Atemminutenvolumens an Ergospirometern werden zunächst auf STPD-Werte nach der Beziehung:

$$V_{\text{STPD}} = V_{\text{BTPS}} \cdot \frac{273}{310} \cdot \frac{P_B - 47 \frac{\text{mmHg}}{\text{mmHg}}}{760}$$

umgerechnet.

Dabei bedeutet V_{STPD} das Atemminutenvolumen unter Standardbedingungen, V_{BTPS} das Atemminutenvolumen unter Körperbedingungen und P_B den Barometerdruck.

Zum Vergleich der Atemminutenvolumenwerte der drei Ergospirometersysteme in identischen Zeit- und Belastungsbereichen wählen wir folgende zwei Methoden der Bewertung:

1. Die Spitzenwerte

Hierbei werden die STPD-Atemminutenvolumenwerte zu einem bestimmten Zeitpunkt des Versuches bestimmt. Es bietet sich hierfür die letzte Minute der jeweiligen Belastungsstufe an. Bei den vorliegenden Versuchen ist das die 6. Minute der Belastungsstufen.

2. Die Additionswerte

Darunter verstehen wir die Summe der STPD-Minutenvolumenwerte in einer Belastungsstufe. Bei den vorliegenden Versuchsreihen entspricht das jeweils dem Summenwert der 1. mit 6. Minute, der 7. mit 12. Minute und der 13. mit 18. Minute der Belastung.

Entscheidend für den Vergleich der drei verschiedenen Systeme ist die Summe der STPD-Minutenvolumenwerte der gesamten Belastungsphase.

IV. Belastungsstufen der einzelnen Meßreihen

1. Meßreihe I.

Es werden hintereinander drei Belastungsstufen von je 6 Minuten Dauer gemessen. Die Belastungsintensitäten sind dabei 100, 125 und 150 Watt.

Die Probanden sind gesunde, trainierte Männer im Alter von 23 bis 26 Jahren.

2. Meßreihe II.

Es werden hintereinander zwei Belastungsstufen von je 6 Minuten Dauer gemessen. Die Belastungsintensitäten sind dabei 100 und 125 Watt.

Nach der Belastung wird weitere 10 Minuten in körperlicher Ruhe gemessen.

Die Probanden sind gesunde, trainierte Mädchen mit einem Durchschnittsalter von 22 Jahren.

3. Meßreihe III.

Vor Beginn der Belastung werden die Probanden 15 Minuten in Ruhe an die Geräte angeschlossen.

Danach werden hintereinander drei Belastungsstufen von je 6 Minuten Dauer gemessen.

Nach der Belastung werden weitere 27 Minuten in körperlicher Ruhe registriert.

Die Probanden sind durchwegs gesunde Männer mit einem Durchschnittsalter von 25 Jahren, die alle im aktiven allgemeinen Sporttraining stehen.

V. Allgemeine Versuchsbedingungen

1. Die Versuche fanden ausschließlich in der Zeit von 9 Uhr bis 11 Uhr vormittags statt.
2. Eine psychische Belastung durch die geforderte Leistung war nicht vorhanden, wenn es zu einer psychischen Beeinträchtigung der Probanden kam, dann nur durch den Anschluß an das jeweilige System.
3. Die mittlere Raumtemperatur betrug 18 Grad Celsius (Keine Extremwerte).
4. Der mittlere Luftdruck war 731 mmHg (Keine Extremwerte).
5. Die mittlere Luftfeuchtigkeit war 49 % (Keine Extremwerte).

VI. Systemspezifischer Versuchsablauf

1. Geschlossenes System

Der Proband erscheint mit Sporthose und Schuhen, er bestimmt die Sattelhöhe des Fahrradergometers, nimmt auf dem Sattel Platz und wird an das System angeschlossen.

Ihm wird eine Vollsichtmaske aus Plexiglas über das Gesicht gezogen, die mit Gummisträngen am Hinterkopf fixiert und mit einem aufblasbaren Gummiring abgedichtet ist.

Nach der Ruheatmung (Meßreihe III) erfolgt die Belastung in den drei genannten Stufen. Danach bleibt der Proband weitere 10 Minuten auf dem Ergometer sitzen und steigt nach dieser Zeit auf einen bequemen, gepolsterten Stuhl mit Lehne und Armstützen um (Meßreihe III). In dieser Stellung atmet er weitere 17 Minuten.

2. Offenes System

Nach individueller Sattelleinstellung am Fahrradergometer sitzt der Proband in Sporthose und Schuhen zunächst 15 Minuten in Ruhe an das System angeschlossen auf dem Fahrrad (Meßreihe III).

Der Anschluß erfolgt über ein Plastikmundstück, das mit dem Fleisch'schen Pneumotachographen gekoppelt ist. Die starre Montage des Atemstromrezeptors läßt keine Bewegung von Kopf und Nacken zu.

Die Belastung erfolgt in drei Stufen.

Anschließend verbleibt der Proband noch für 10 Minuten auf dem Fahrrad, um dann auf einen bequemen Stuhl umzusteigen und weitere 17 Minuten an die Apparatur gekoppelt weiterzuatmen (Meßreihe III).

3. Ventilgesteuertes System

Nach individueller Sattelleinstellung wartet der Proband in Sporthose und Schuhen 15 Minuten in Ruhe auf dem Fahrradergometer (Meßreihe III). Er ist dabei mit einer Gummimaske die nur Nase und Mund einschließt über einen Schlauch mit dem System verbunden.

Der Proband hat die Möglichkeit sich zu drehen und zu bewegen.

Die Belastung erfolgt in drei Stufen.

Nach der Belastung bleibt der Proband noch für 10 Minuten auf dem Fahrrad sitzen und steigt dann für weitere 17 Minuten auf einen bequemen Stuhl über, während er mit dem System verbunden bleibt (Meßreihe III).

VII. Bestimmung der verschiedenen Schwellen des Atemminutenvolumens beim geschlossenen, offenen und ventilgesteuerten System.
Diese Schwellenbestimmung ist nur bei der Meßreihe III möglich, da sie allein die für die Schwellenbestimmungen nötige Vor- und Nachatmungsphase aufweist.

1. Voratmungsschwelle als Mittelwert der Atemminutenvolumina der 15 Minuten Voratmung.
2. Voratmungsschwelle als Mittelwert der Atemminutenvolumina der ersten 5 Minuten der Voratmung.
 - 2a. Der Vergleich dieser Voratmungsschwelle mit der Voratmungsschwelle über 15 Minuten Dauer soll zeigen, wie lange die geforderte Mindestvoratmung sein soll.
3. Nachatmungsschwelle als Mittelwert der Atemminutenvolumina der 11. mit 25. Minute der Nachatmungsphase.

Auf das Zeitintervall zwischen 11. und 25. Minute der Nachatmungsphase kommt man überschlägig durch die Auswertung des Differenzquotienten, der besagt, daß bei unserer Versuchsanordnung in diesem Intervall die neue Ruheschwelle = Nachatmungsschwelle erreicht ist.
4. Gesamtschwelle als arithmetisches Mittel von Voratmungsschwelle aus 15 Minuten Voratmung und Nachatmungsschwelle.

VIII. Bestimmung des Differenzquotienten der Atemminutenvolumen-Meßwertkurven

Man geht dabei so vor, daß man den jeweils n-ten Atemminutenvolumenwert durch den (n-1)-ten Atemminutenvolumenwert dividiert.

Es ist zu erwarten, daß sich aus der graphischen Darstellung dieser Werte in Abhängigkeit von der Zeit, der sogenannten Differenzquotientenkurve, charakteristische Züge der Atemminutenvolumenmessung deutlich ablesen lassen.

Doch auch schon allein die Zahlenwerte des Differenzquotienten geben bei einer Größe von 20 % über oder unter dem 100%-Wert Aufschluß darüber, daß sich die Charakteristik der Atemminutenvolumina entscheidend ändert.

Bei der graphischen Darstellung ist besondere Beachtung Gipfelverschiebungen des markierten Leistungseinsatzpunktes der verschiedenen Systeme zu schenken. Wenn solche Gipfelverschiebungen auftreten, sprechen sie eindeutig für eine Zeitverspätung der Meßfühler und fordern eine entsprechende Korrektur der Meßergebnisse. Weiterhin sollte an der Rückkehr der negativen Phase der Differenzquotientenkurve nach Belastungsende auf die 100%-Linie das Erreichen der Schwelle der Nachatmungsphase erkenntlich werden. Die Rückkehr auf die 100%-Linie sagt allerdings nichts darüber aus, ob sich der Absolutwert der Schwelle im Vergleich zur Voratmung verändert hat. Das wäre nur aus der graphischen Darstellung der Atemminutenvolumenwerte in Abhängigkeit von der Zeit oder durch Mittelwertbildung der entsprechenden Phase der Nachatmung zu erkennen.

IX. Korrekturen der Meßergebnisse der Atemminutenvolumina nach Schwelle und Zeitverspätung

Für diese Korrekturen kommt aus oben geschilderten Gründen nur die Meßreihe III in Frage.

1. Schwellenkorrektur

Als Bezugsschwelle wählen wir willkürlich die Schwelle des geschlossenen Systems. Bei der Schwellenkorrektur ist so vorzugehen, daß die Gesamtschwelle des Bezugssystems als Grundwert angenommen wird und dann die Abweichungen der Gesamtschwelle der anderen Systeme im Zahlenwert bestimmt werden. Diese Abweichung in Liter/Minute wird mit der Zeit der verglichenen Versuchsphase multipliziert und mit dem umgekehrten Vorzeichen der Einzelabweichung entweder addiert oder subtrahiert.

2. Zeitverspätungskorrektur

Durch Vergleich der positiven initialen und der negativen terminalen Gipfel der Differentialquotientenkurve in Beziehung zum Leistungseinsatz und Belastungsabbruch läßt sich sofort entscheiden, ob eine Schwellenkorrektur nötig ist.

Hat sich nun erwiesen, daß eine Gipfelverschiebung bei zwei zu vergleichenden Differenzquotientenkurven vorhanden ist, so wird die genaue Bestimmung der Zeit, um die verschoben ist, folgendermaßen durchgeführt:

Die Atemminutenvolumenkurven in Abhängigkeit von der Zeit der Test- und Vergleichsmessungen werden durch Parallelverschiebung

zur Ordinate mit ihren steil ansteigenden Schenkeln zur Deckung gebracht.

An den Markierungen des Leistungseinsatzes wie des Leistungsabbruches beider Meßkurven kann nun an ihrer Verlagerung in der Abszisse die Zeitverspätung abgelesen werden.

Da unsere Atemminutenvolumenmessungen im Abstand von je einer Minute erfolgen muß folgerichtig die 30-Sekundenmarke als Trennungspunkt zweier Meßwerte gelten. Ist die Zeitverspätung also geringer als 30 Sekunden, so wird auf den ursprünglichen Kurvenpunkt, ist sie größer als 30 Sekunden, dann auf den nächstfolgenden Minutenwert als identischen Kurvenpunkt bezogen.

Die Bezugsstrecke in der Abszisse bleibt dabei immer gleich lang, d.h. der Leistungsabfallpunkt verschiebt sich gleichsinnig mit dem Leistungseinsatzpunkt um die gleiche Strecke (Vgl. Abb. 6).

E. VERSUCHSERGEBNISSE

I. Objektive Meßergebnisse

In den folgenden Ausführungen verstehen sich die Zahlenangaben als STPD-Werte der Atemminutenvolumina in Litern.

Die Prozentangaben beziehen sich immer auf die Werte des geschlossenen Systems als Vergleichssystem (Geschlossenes System = 100 %).

Abkürzungen: Belastungsstufe = BS

Geschlossenes System = GS

Offenes System = OS

Ventilgesteuertes System = VS

1. Unkorrigierte Meßergebnisse

a) Meßreihe I. (Nur Spitzenwerte zu jeder 6. Minute der Belastungsstufe)

aa) BS 100 Watt:

GS:	26,83	=	100 %
OS:	32,09	=	119,6 %
VS:	32,35	=	120,6 %

bb) BS 125 Watt:

GS:	35,53	=	100 %
OS:	38,44	=	108 %
VS:	40,22	=	113 %

cc) BS 150 Watt:

GS:	39,79	=	100 %
OS:	44,81	=	112,6 %
VS:	44,19	=	111 %

b) Meßreihe II

Spitzenwerte zu jeder 6. Minute der Belastungsstufe.

aa) BS 100 Watt:

GS:	30,9	=	100 %
OS:	34,1	=	110,4 %
VS:	35,9	=	116 %

bb) BS 125 Watt:

GS:	43,8	=	100 %
OS:	43,1	=	98,4 %
VS:	46,8	=	106,8 %

Additionswerte der einzelnen Belastungsstufen.

aa) BS 100 Watt:

GS:	137,9	=	100 %
OS:	157,8	=	114 %
VS:	152,8	=	111 %

bb) BS 125 Watt:

GS:	238,0	=	100 %
OS:	243,2	=	102 %
VS:	260,5	=	109 %

cc) Gesamtbelastung 100 + 125 Watt:

GS:	375,9	=	100 %
OS:	401,0	=	107 %
VS:	413,3	=	110 %

c) Meßreihe III

Spitzenwerte zu jeder 6. Minute der Belastungsstufe.

aa) BS 100 Watt:

GS:	26,0	=	100 %
OS:	30,8	=	118 %
VS:	30,6	=	117 %

bb) BS 125 Watt:

GS:	33,5	=	100 %
OS:	38,9	=	116 %
VS:	38,4	=	114 %

cc) BS 150 Watt:

GS:	45,9	=	100 %
OS:	46,3	=	101 %
VS:	44,6	=	97 %

Additionswerte der einzelnen Belastungsstufen.

aa) BS 100 Watt:

GS:	137,4	=	100 %
OS:	158,2	=	115 %
VS:	153,6	=	112 %

bb) BS 125 Watt:

GS:	195,6	=	100 %
OS:	248,3	=	127 %
VS:	216,4	=	111 %

cc) BS 150 Watt:

GS:	237,4	=	100 %
OS:	265,8	=	112 %
VS:	254,4	=	107 %

dd) Gesamtbelastung: 100 + 125 + 150 Watt:

GS:	570,4	=	100 %
OS:	672,3	=	118 %
VS:	624,4	=	109 %

ee) Gesamtbelastung + 10 Minuten Nachatmung.

GS:	698,5	=	100 %
OS:	858,5	=	123 %
VS:	816,9	=	117 %

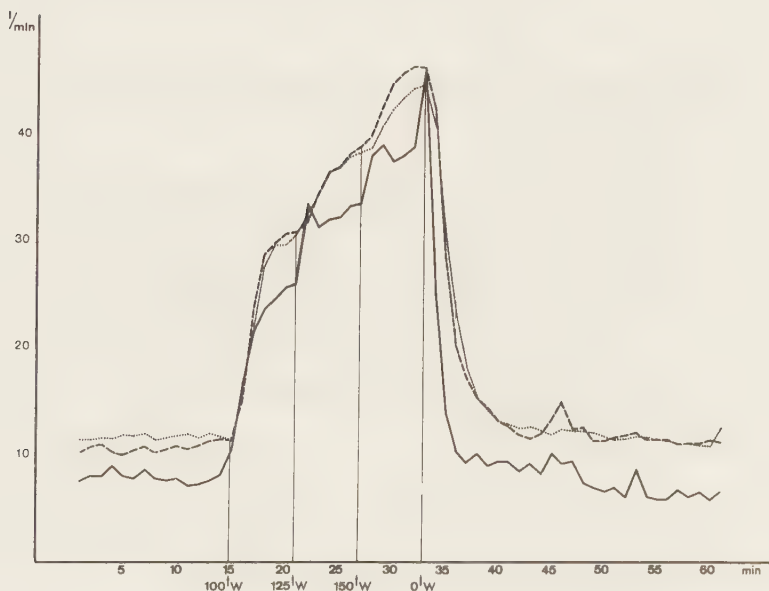


Abbildung 1. Atemminutenvolumina von geschlossenem ———, offenem ----- und ventilgesteuertem System Unkorrigiert (umgeordnet auf STPT-Werte), Meßreihe III. Aus dieser Abb. läßt sich deutlich die unterschiedliche Vor- und Nachatmungsschwelle der drei Systeme erkennen. Eine mögliche Zeitverspätung ist wegen der unterschiedlichen Ruheschwellen noch nicht ersichtbar.

d) Schwellen

1. Voratmunsschwelle aus 15 Minuten Voratmung.

GS: 7,94

OS: 10,60

VS: 11,57

2. Voratmunsschwelle aus den ersten 5 Minuten der Voratmung.

GS: 8,0

OS: 10,3

VS: 11,4

3. Nachatmungsschwelle aus den Atemminutenvolumenwerten der 11. mit 25. Minute der Nachatmungsphase.

Die beim offenen und geschlossenen System 10 Minuten nach Leistungsabbruch auftretenden kleinen Gipfel, die durch die Umlagerung der Probanden auf einen bequemen Stuhl bedingt sind, können, wie das in der vorliegenden Arbeit geschah, ohne Bedenken graphisch durch Interpolieren korrigiert werden.

GS: 6,87

OS: 11,35

VS: 11,60

4. Gesamtschwelle als Mittelwert von Vor- (15-Minuten) und Nachatmungsschwelle.

GS: 7,40

OS: 10,97

VS: 11,58

5. Abweichungen der Gesamtschwellen der beiden anderen Systeme vom geschlossenen System.

OS: + 3,57 Liter/Minute

VS: + 4,18 Liter/Minute

6. Vergleich der Voratmungsschwelle über 15 Minuten und der Voratmunsschwelle über die ersten 5 Minuten der Voratmung. Die Abweichungen beider Schwellen voneinander werden in absoluten Werten und in % des 15-Minutenwertes angegeben.

System	15 Minuten	5 Minuten	Differenz	
			absolut	in %
GS	7,94	8,0	0,06	0
OS	10,60	10,3	0,30	3
VS	11,57	11,4	0,17	1

7. Abweichungen von Voratmungsschwellen zu Nachatmungsschwellen.

Angabe der Abweichungen wie bei 6.

System	Voratmung	Nachatmung	Differenz	
			absolut	in %
GS	7,94	6,87	1,07	13,4
OS	10,60	11,35	0,75	7,1
VS	11,57	11,60	0,03	0

e) Differenzquotientenkurven

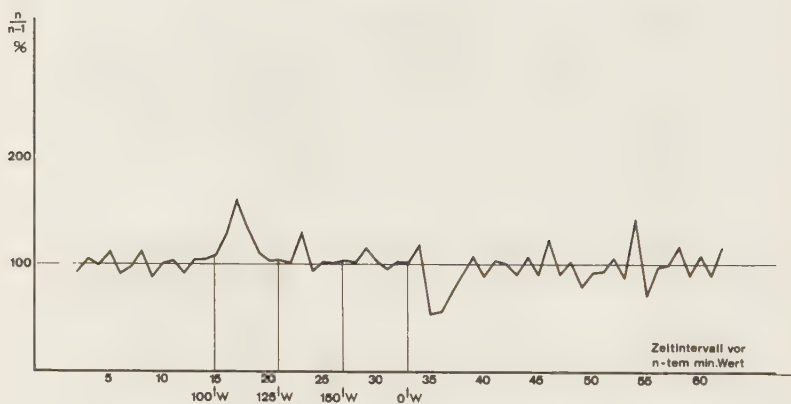


Abbildung 2. Differenzquotientenkurve des geschlossenen Systems für Atemminutenvolumina. .
Meßreihe III,
n = Minutenvolumenwert.

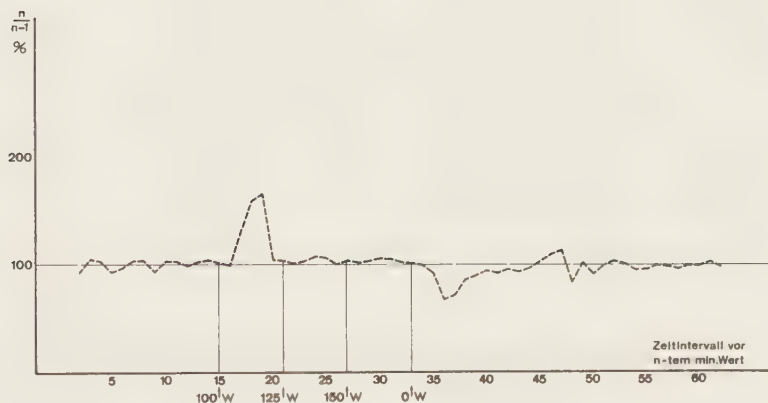


Abbildung 3. Differenzquotientenkurve der Atemminutenvolumina des offenen Systems.
 Meßreihe III,
 n = Minutenvolumenwert.
 Es ist deutlich die Divergenz der Maxima dieser Kurve beim Vergleich mit den Gipfeln der Differenzquotientenkurve des geschlossenen Systems zu erkennen.

Aus dem Vergleich der Differenzquotientenkurven der drei Systeme der Ergospirometrie bei Atemminutenvolumenbestimmung der Meßreihe III läßt sich deutlich erkennen, daß beim offenen (Abb. 3) und beim ventilgesteuerten System (Abb. 4) sowohl die initialen positiven wie die terminalen negativen Gipfel gegenüber dem willkürlich als Bezugssystem gewählten geschlossenen System (Abb. 2) nach rechts verschoben sind.

Mittels der graphischen Darstellung der Absolutwerte der Atemminutenvolumina in Abhängigkeit von der Zeit ist nun zu prüfen, wie groß die zeitliche Rezeptionsverzögerung ist.

Genaue Beschreibung des Verfahrens unter D, IX, 2.

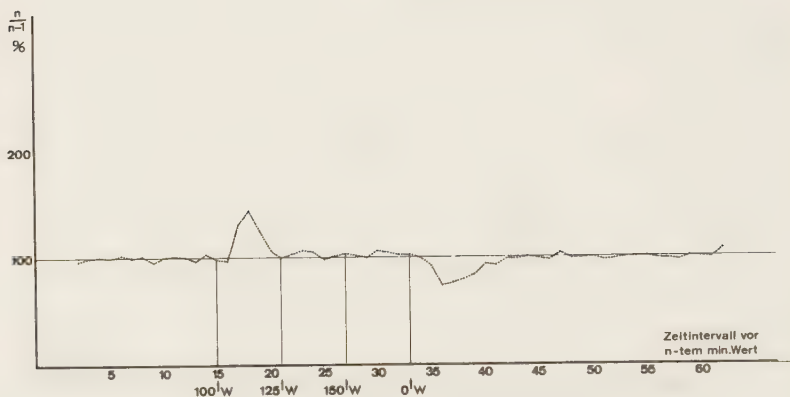


Abbildung 4. Differenzquotientenkurve der Atemminutenvolumina des ventilgesteuerten Systems.
 Meßreihe III,
 n = Minutenvolumenwert.
 Es ist deutlich die Divergenz der Gipfel von den Maxima der Differenzquotientenkurve des geschlossenen Systems erkennbar (Bezugspunkt Leistungseinsatz).

2. Korrigierte Meßergebnisse

a) Korrektur der Versuchsergebnisse der Meßreihe III nach:

1. der Gesamtschwelle des Atemminutenvolumens.

(Der korrigierte Endwert entwickelt sich, wie in D, IX, 1. ausführlich beschrieben, aus: Unkorrigierter Wert $\pm$ Schwellenabweichung zum Vergleichssystem $\times$ Zeit der Versuchsphase.)

a) Gesamtbelastung: 100 + 125 + 150 Watt.

aa) GS: $570,4 \pm 0 \times 18 = 570,4 = 100 \%$
bb) OS: $672,3 - 3,57 \times 18 = 608,0 = 106,6 \%$
cc) VS: $624,4 - 4,18 \times 18 = 549,2 = 96,2 \%$

b) Gesamtbelastung + 10 Minuten Nachatmung.

aa) GS: $698,5 \pm 0 \times 28 = 698,5 = 100 \%$
bb) OS: $858,5 - 3,57 \times 28 = 758,5 = 108,6 \%$
cc) VS: $816,9 - 4,18 \times 28 = 699,9 = 100,2 \%$

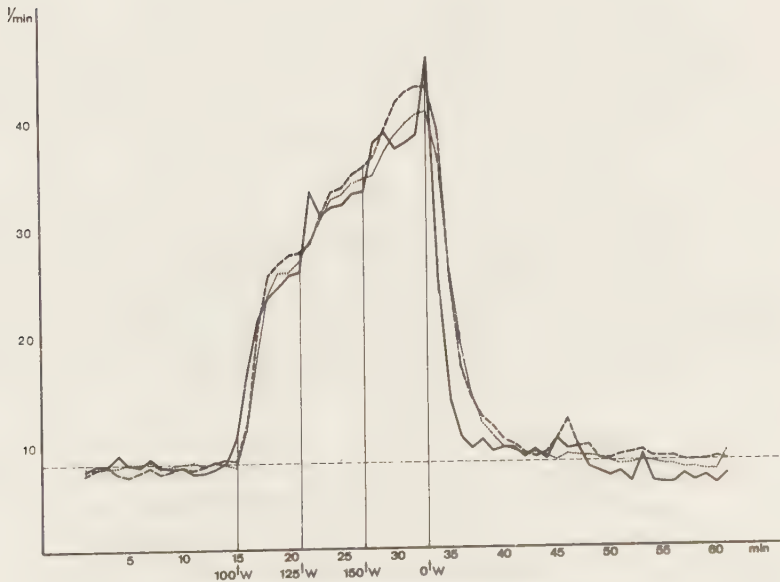


Abbildung 5. Atemminutenvolumina des geschlossenen——, offenen----- und ventilgesteuerten Systems nach der Gesamtschwelle korrigiert. Meßreihe III. Man sieht deutlich die Zeitverspätung von offenem und ventilgesteuertem System beim Abheben von der Ruheschwelle.

2. der Zeitverspätung.

a) Offenes System

Bringt man den aufsteigenden Schenkel von geschlossenem und offenem System nach Schwellenkorrektur zur Deckung, dann läßt sich in der Abszisse eine Zeitverspätung des offenen Systems gegenüber dem geschlossenen von ca. 25 Sekunden ermitteln.

Da, wie in D, IX, 2. bereits ausführlich berichtet, unsere Meßintervalle 1 Minute betragen und demnach also in diesem Falle der Umschlagspunkt bei 30 Sekunden liegt und nicht überschritten wird, muß das offene System nicht korrigiert werden.

b) Ventilgesteuertes System.

Nach Parallelverschiebung von steil aufsteigendem Schenkel der Atemminutenvolumenkurve des ventilgesteuerten Systems zum steilen Schenkel des geschlossenen Systems läßt sich bei Deckung in der Abszisse eine Zeitverspätung von 48 Sekunden ermitteln. Dieser Zeitwert liegt über dem Umschlagswert bei 30 Sekunden und rechtfertigt deshalb eine Verschiebung der Meßwerte des ventilgesteuerten Systems um eine volle Zeiteinheit (= 1 Minute) nach links. Es entspricht dann dem Meßwert der 1. Minute nach Belastung beim geschlossenen System der Wert der 2. Minute beim ventilgesteuerten System.

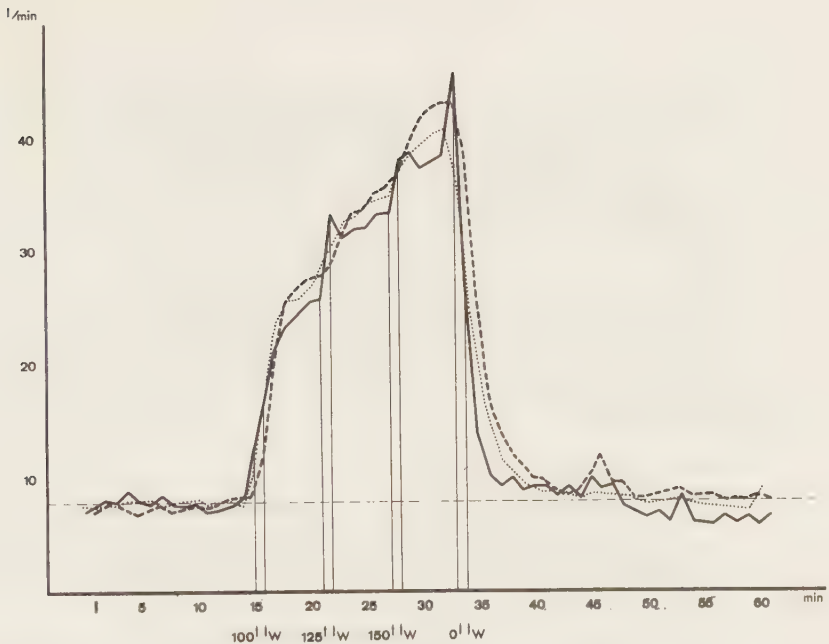


Abbildung 6. Atemminutenvolumina des geschlossenen ———, offenen ----- und ventilgesteuerten Systems nach Schwellen- und Zeitverspätungskorrektur. Meßreihe III.
(Geschlossenes System als Bezugssystem unkorrigiert, offenes System schwellenkorrigiert, ventilgesteuertes System nach obigen Ausführungen schwellen- + zeitverspätungskorrigiert.)

Praktisch geht man bei der Zeitverspätungskorrektur des ventilgesteuerten Systems so vor, daß man vom schwellenkorrigierten Wert dieses Systems den 1. Minutenvolumenwert bei Belastungsstufe 100 Watt subtrahiert und den 1. Minutenvolumenwert nach Belastungsabbruch addiert, da, wie sich aus dem Vorhergehenden ergibt, die Meßwerte des ventilgesteuerten Systems insgesamt um eine Zeiteinheit nach links verschoben werden müssen.

Nach Schwellen- und Zeitverspätungskorrektur liegen die Ergebnisse der Meßreihe III bei Gesamtbelastung (100 + 125 + 150 Watt) wie folgt:

GS:	570,4	=	100 %
OS:	608,0	=	106,6 %
VS:	549,2 - 14,9 + 40,5	=	574,8 = 100,7 %

II. Vergleich der Systeme in subjektiven Äußerungen der Probanden.

1. Geschlossenes System

Alle Probanden gaben an, daß die Auflagestellen der Vollsichtmaske an Kinn und Stirn nach etwa 20 Minuten zu schmerzen beginnen. Mit zunehmendem Verweilen unter der Maske steigern sich die Schmerzen bis ins fast unerträgliche. Alle Versuchspersonen klagten nach den langen Versuchen der Meßreihe III über Kopfschmerzen und Schwindelgefühl.

2. Offenes System

Die starre Haltung auf dem Fahrrad wird von den Probanden unangenehm empfunden. Nach längerer Versuchsdauer, wie sie in der Meßreihe III bestand, wurden Schmerzen in der Nacken- und Rückenmuskulatur angegeben.

Als sehr unangenehm wurde von allen Versuchspersonen die auf 37 Grad Celsius aufgeheizte Inspirationsluft empfunden. Nach 15 bis 20 Minuten Versuchsdauer trockneten Mund und Rachen derart aus, daß jede Schluckbewegung schmerzhaft wurde.

3. Ventilgesteuertes System

Von den verwendeten Systemen der Ergospirometrie wurde das ventilgesteuerte System von allen Probanden, sowohl während der Belastung, als auch in der Nachatmungsphase, als angenehm empfunden.

Der Bewußtseinsgrad wurde bei keinem Probanden unangenehm beeinflusst.

Die allgemeine Körperhaltung wurde als bequem bezeichnet.

F. Vergleichende Übersicht der Relativwerte der Meßreihen I, II und III.

Das geschlossene System dient als Bezugssystem und erhält demnach den Relativwert 100 %.

In der folgenden Übersicht handelt es sich bei den Relativwertangaben stets um das Verhältnis von geschlossenem : offenem : ventilgesteuertem System.

1. Meßreihe I.

Spitzenwerte zu jeder 6. Minute der BS.

BS: 100 Watt 100 : 119,6 : 120,6

BS: 125 Watt 100 : 108 : 113

BS: 150 Watt 100 : 112,6 : 111

2. Meßreihe II.

a) Spitzenwerte zu jeder 6. Minute der BS.

BS: 100 Watt 100 : 110,4 : 116

BS: 125 Watt 100 : 98,4 : 106,8

b) Additionswerte der einzelnen Belastungsstufen.

BS: 100 Watt 100 : 114 : 111

BS: 125 Watt 100 : 102 : 109

Gesamtbelastung 100 : 107 : 110

3. Meßreihe III.

a) Spitzenwerte zu jeder 6. Minute der BS.

BS: 100 Watt 100 : 118 : 117

BS: 125 Watt 100 : 116 : 114

BS: 150 Watt 100 : 101 : 97

b) Additionswerte der einzelnen Belastungsstufen.

I. Unkorrigierte Ergebnisse

BS: 100 Watt	100 : 115 : 112
BS: 125 Watt	100 : 127 : 111
BS: 150 Watt	100 : 112 : 107
Gesamtbelastung	100 : 118 : 109
Gesamtbelastung + 10	
Minuten Nachatmung	100 : 123 : 117

II. Korrigierte Ergebnisse

Die Korrektur erfolgte nach der Gesamtschwelle und der Zeitverspätung der einzelnen Systeme gegenüber dem Vergleichssystem.

BS: 100 Watt	100 : 99,6 : 106,3
BS: 125 Watt	100 : 116 : 100,4
BS: 150 Watt	100 : 102,9 : 97,3
Gesamtbelastung	100 : 106,6 : 100,7

G. Weitere Korrekturmöglichkeit der Meßergebnisse des offenen Systems

Während das schwellen- und zeitverspätungskorrigierte Ergebnis des ventilgesteuerten Systems mit einem Verhältnis von 100,7 : 100 zum Bezugssystem voll befriedigt, drängt das durch Schwellen- und Zeitverspätungskorrektur gewonnene Ergebnis des offenen Systems mit einem Verhältnis von 106,6 : 100 zum Bezugssystem nach einer zusätzlichen weiteren Korrektur.

Den Weg dazu glauben wir damit gefunden zu haben, daß wir das offene System rechnerisch von dem systematischen Fehler, den der vermehrte Totraum des Pneumotachographen mit sich bringt, befreien. Bekanntlich weist das offene System durch die Zwischenschaltung des Pneumotachographen einen um 140 ml vermehrten Totraum auf, der notwendigerweise zu einer Mehratmung an Volumen führen muß. (Verminderter O_2 -Gehalt und vermehrter CO_2 -Gehalt der zur Inspiration kommenden Mischluft bedingen über Erregung der körpereigenen Rezeptoren eine Mehratmung an Volumen.)

Der relativ große Fehler, der in Ruheatmung durch den zusätzlichen Totraum entsteht, läßt sich voll durch die Korrektur mit der Gesamtschwelle ausschalten. (Nach der Definition der Schwellenkorrektur wird dieser in Ruhe recht konstante aufsummierte Wert, der durch das erhöhte Totraumvolumen bedingt ist, einfach subtrahiert bei der Anpassung an das Bezugssystem.)

Bei Belastung jedoch steigt nicht nur die Atemtiefe, sondern auch die Atemfrequenz recht erheblich an.

Dadurch schleicht sich der durch den Totraum bedingte Fehler wieder in die Messung ein. (Bei Schwellenangleichung wird ja auch während der Leistungsphase nur das in Ruhe durch Totraum vermehrte Atemminutenvolumen subtrahiert.)

Unser Bestreben zielt nun dahin, den während der Belastung sich zusätzlich auswirkenden Anstieg des durch Totraum bedingten Fehlers zu eliminieren.

Wir gehen dabei so vor, daß wir das Produkt aus der mittleren Frequenzzunahme pro Minute innerhalb der Leistungsstrecke (df), multipliziert mit der Zeit der Leistungsphase und dem Totraumvolumen vom schwellen- und zeitverspätungskorrigierten Wert des offenen Systems zusätzlich subtrahieren.

Im Zahlenbeispiel sieht das bei offenen System (Meßreihe III, Gesamtbelastung) so aus:

1. Schwellen- und zeitverspätungskorrigierter Atemminutenvolumenwert des offenen Systems: 608,0 Liter
2. Mittlere Frequenzzunahme in der gesamten Leistungsphase pro Minute: ca. 7,9
3. Totraumvolumen: 0,140 Liter
4. Dauer der Gesamtbelastung: 18 Minuten
5. Aus 2, 3 und 4 sich entwickelndes Subtraktionsprodukt: $7,9 \times 0,140 \times 18 = 19,88$ Liter
6. Schwellen-, zeitverspätungs- und totraumkorrigierter Endwert des offenen Systems:
 $608,0 - 7,9 \times 0,140 \times 18 = 588,8$

Bei einer Absolutgröße des Bezugswertes des geschlossenen Systems von 570,4 Liter ergibt sich demnach ein Verhältnis Bezugssystem : offenes System wie 100 : 103,7 %.

H. DISKUSSION

in der vorliegenden Arbeit konnte nachgewiesen werden, daß bei Belastungen bis 150 Watt von entscheidender Bedeutung ist, an welchem System der Ergospirometrie Meßergebnisse der Atemminutenvolumina gewonnen wurden (geschlossenes System = GS, offenes System = OS, ventilgesteuertes System = VS). Weiterhin erwies sich von entscheidender Bedeutung, nach welchen Gesichtspunkten die Meßergebnisse der einzelnen Meßreihen ausgewertet wurden.

Zum Beweis der oben angeführten Behauptungen testeten wir die drei Systeme der Ergospirometrie an folgender Versuchsanordnung (Meßreihe III):

Vor Beginn der Belastung der Probanden erfolgte eine Ruheatmung von 15 Minuten Dauer bei angeschlossenem Gerät.

Darauf folgte die Belastungsphase mit den Stufen der Belastung 100 Watt, 125 Watt und 150 Watt. Jede Belastungsstufe dauerte 6 Minuten.

Nach Abbruch der Belastung wurde wiederum in körperlicher Ruhe noch eine Zeit von 27 Minuten am angekoppelten Gerät weitergeatmet.

I. Aus der Meßreihe III konnten wir nun folgende Ergebnisse ableiten:

1. Die Höhe der durchschnittlichen Ruheatmung (Mittelwerte aus 15 Minuten Voratmung) schwankt bei den verschiedenen Systemen sehr erheblich:

GS:	7,94 Liter/Minute	=	100 %
OS:	10,60 Liter/Minute	=	133,5 %
VS:	11,57 Liter/Minute	=	145,7 %

Nimmt man den Wert des geschlossenen Systems als Bezugswert an, so ergibt sich eine Differenz von 33,5 % zum offenen und 45,7 % zum ventilgesteuerten System.

Da auf Grund der völlig identischen Versuchsanordnung andere Fehler auszuschließen sind, bedeutet das, daß schon bei Ruheatmung unzumutbare Unterschiede zwischen geschlossenem, offenem und ventilgesteuertem System auftreten.

2. In der anschließenden Belastungsphase von 100 Watt zeigt sich nach der Spitzenwertbestimmung der 6. Minute der Belastung eine große Differenz der drei Systeme:

GS:	26,0 Liter in der 6. Minute	=	100 %
OS:	30,8 Liter in der 6. Minute	=	118 %
VS:	30,6 Liter in der 6. Minute	=	117 %

Ebenso bei der Addition der 6 Minutenwerte der Belastungsstufe 100 Watt:

GS:	137,4 Liter in 6 Minuten	=	100 %
OS:	158,2 Liter in 6 Minuten	=	115 %
VS:	153,6 Liter in 6 Minuten	=	112 %

3. Bei der folgenden Belastungsstufe von 125 Watt ändert sich die Größe der Differenz der einzelnen Systeme kaum, wie die Spitzenwertbestimmung der jeweils 6. Minute der Belastungsstufe:

GS:	33,5 Liter in der 6. Minute	=	100 %
OS:	38,9 Liter in der 6. Minute	=	116 %
VS:	38,4 Liter in der 6. Minute	=	114 %

und die Addition der 6 Minutenwerte der Belastungsstufe mit:

GS: 195,6 Liter in 6 Minuten = 100 %

OS: 248,3 Liter in 6 Minuten = 127 %

VS: 216,4 Liter in 6 Minuten = 111 %

deutlich zeigt.

4. Bei der 3. Belastungsstufe mit 150 Watt sank nach der Spitzenwertbestimmung zur letzten Minute der Belastungsstufe der vorher erhöhte Wert von offenem und ventilgesteuertem System auf annähernd Parallelität mit dem geschlossenen System ab. (Ähnlich berichtet ROSKAMM in Sportarzt und Sportmedizin 3/70).

GS: 45,9 Liter in der 6. Minute = 100 %

OS: 46,3 Liter in der 6. Minute = 101 %

VS: 44,6 Liter in der 6. Minute = 97 %

Bei der doch wesentlich aussagefähigeren Methode der Addition der Einzelminutenwerte während der Belastungsstufe 150 Watt ergibt sich jedoch noch immer ein, wenn auch gegenüber den ersten Belastungsstufen gering verminderter Fehler von:

GS: 237,4 Liter in 6 Minuten = 100 %

OS: 265,8 Liter in 6 Minuten = 112 %

VS: 254,4 Liter in 6 Minuten = 107 %

5. Ein Vergleich der Atemminutenvolumenwerte bei Gesamtbelastung (100 + 125 + 150 Watt) ergibt Abweichungen von 18 % des offenen und 9 % des ventilgesteuerten Systems von den Meßwerten des geschlossenen Systems:

GS: 570,4 Liter in 18 Minuten = 100 %
OS: 672,3 Liter in 18 Minuten = 118 %
VS: 624,4 Liter in 18 Minuten = 109 %

6. Eine ebenfalls enorme Abweichung der drei Systeme untereinander zeigt die Höhe der Ruheatmung nach Abgleich der Hyperventilation nach Belastung (11. bis 25. Minute der Nachatmungsphase).

GS: 6,87 Liter/Minute = 100 %
OS: 11,35 Liter/Minute = 165 %
VS: 11,60 Liter/Minute = 169 %

7. Ein Vergleich von Voratmungsschwelle und Nachatmungsschwelle jedes der drei Systeme zeigt, daß das GS mit einer Differenz von 13,4 % am meisten abweicht, gefolgt vom offenen System mit 7,1 %. Das VS verhält sich mit 0 % Abweichung völlig konstant.

Voratmungsschwelle	Nachatmungsschwelle
GS: 7,94 l/min	6,87 l/min 1,07 (Diff.) = 13,4 %
OS: 10,60 l/min	11,35 l/min 0,75 (Diff.) = 7,1 %
VS: 11,57 l/min	11,60 l/min 0,03 (Diff.) = 0 %

8. Vergleicht man die Gesamtschwelle (Mittelwert aus Vor- und Nachatmungsschwelle) der drei Systeme, so ergeben sich folgende Unterschiede, wobei das GS als Bezugssystem fungiert:

GS:	$\pm$	0,0 Liter/Minute
OS:	+	3,57 Liter/Minute
VS:	+	4,18 Liter/Minute

9. Ein Vergleich der Voratmungsschwelle der drei Systeme, wobei einmal die gesamte Voratmungszeit von 15 Minuten, das anderemal jedoch nur die ersten 5 Minuten dieser Voratmungsphase gemittelt wurden, zeigt, daß die 5- und die 15-Minutenwerte gut harmonisieren. Im Grenzfall läßt sich also die Dauer der Voratmungsphase jederzeit auf 5 Minuten beschränken.

GS:	0 %	} Differenz von 5-Minutenschwelle zur 15-Minuten-Voratmungsschwelle
OS:	3 %	
VS:	1 %	

- II. Um diese so differenten Meßergebnisse der drei Systeme der Ergospirometrie einander angleichen zu können, geben wir folgende Methode an:
(Das GS wurde willkürlich immer als Bezugssystem gewählt.)

1. SCHWELLENABGLEICHUNG

Zur Übersicht noch einmal kurz die Gesamtschwellen der drei Systeme der Ergospirometrie in Meßreihe III:

GS: 6,87 Liter/Minute

OS: 11,35 Liter/Minute = + 3,57 l/min

VS: 11,60 Liter/Minute = + 4,18 l/min

Um die Meßwerte des offenen und ventilgesteuerten Systems denen des geschlossenen Systems anpassen zu können, nehmen wir die Schwelle des GS als Bezugsschwelle an und bringen die Atemminutenvolumenleistungswerte der beiden anderen Systeme auf dieses Schwellenniveau.

Das geschieht so, daß wir die Dauer der Belastung (18 Minuten) mit der jeweiligen Abweichung des zu korrigierenden Systems (OS: 3,57 l/min VS: 4,18 l/min) multiplizieren und das Produkt von den Leistungsadditionswerten der jeweiligen Meßreihen subtrahieren:

GS: $570,4 \pm 0 \times 18 = 570,4 = 100 \%$

OS: $672,3 - 3,57 \times 18 = 608,0 = 106,6 \%$

VS: $624,4 - 4,18 \times 18 = 549,2 = 96,2 \%$

Zum Vergleich die unkorrigierten Werte:

GS: $570,4 = 100 \%$

OS: $672,3 = 118 \%$

VS: $624,4 = 109 \%$

Die Abweichung verringert sich also nach Schwellenkorrektur beim OS um 11,4 %, beim VS um 12,8 %, wobei das VS dabei allerdings unter den gesuchten Wert von 100 %, um 3,8 %, absinkt. (Liegt dabei aber gut innerhalb der Fehlerbreite.)

2. Da auch nach Schwellenkorrektur die Meßergebnisse der drei Systeme noch nicht völlig harmonisieren (100 : 106,6 : 96,2), suchen wir nach weiteren Möglichkeiten der Korrektur der Abweichungen der einzelnen Systeme voneinander.

Dabei konnten wir anhand des hier neu eingeführten "Differenzquotienten" (das ist das Verhältnis von n-tem zu (n - 1)-tem Minutenvolumenwert) feststellen, daß die Rezeptoren der einzelnen Systeme unterschiedlich schnell auf größere Schwankungen des Atemminutenvolumens ansprechen.

Wie ein Vergleich der drei Differenzquotientenkurven zeigt, liegt der Ansprechgipfel beim GS eindeutig früher als beim offenen und ventilgesteuerten System.

Um die genaue Zeit des verspäteten Ansprechens eines Systems zu ermitteln verschieben wir die schwellenkorrigierten Meßkurven von OS und VS (AMV in Abhängigkeit von der Zeit) soweit in der Ordinate zur Kurve des GS, daß die steil ansteigenden linken Meßflanken zur Deckung kommen.

An den markierten Leistungseinsatzpunkten in der Abszisse ist dann die Zeitverspätung abzulesen.

Dabei geht logischerweise bei unseren Meßabständen von 1 Minute die 30-Sekundengrenze als Indikator der Zuordnung von Zeitverspätung in den Korrekturmechanismus ein.

Liegt die Verspätung unter 30 Sekunden, so wird nicht korrigiert, liegt sie über 30 Sekunden, so wird korrigiert.

Bei den Meßergebnissen der Meßreihe III beträgt die graphisch ermittelte Zeitverspätung 25 Sekunden beim offenen System (womit eine Korrektur entfällt) und 48 Sekunden beim VS. Das VS wird demnach zeitverspätungskorrigiert. Diese Zeitverspätungskorrektur geht so vor sich, daß man die gesamte Meßkurve des zu korrigierenden (ventilgesteuerten) Systems um einen Minutenwert nach links rückt. Denn entspricht also dem 1. Belastungsminutenwert des Vergleichssystems (GS) der 2. Belastungsminutenwert des anzupassenden Systems (VS). In der Folge entspricht dann auch der letzte Belastungsminutenwert des Vergleichssystems dem 1. Nachatmungsminutenwert des anzupassenden Systems.

Ergebnisse der Meßreihe III nach Zeitverspätungskorrektur. (Ergebnisse bereits schwellenkorrigiert.)

GS:	570,4	$\pm$	0	=	100 %
OS:	608,0	$\pm$	0	=	106,6 %
VS:	549,2	-	14,9	+	40,5 = 574,8 = 100,7 %

Damit ist es uns durch kombinierte Schwellen- und Zeitverspätungskorrektur gelungen, die Meßergebnisse von GS und VS mit 100 : 100,7 einander völlig anzugleichen.

3. Da nun das offene System dieser letzten Korrekturmaßnahme nicht folgte suchten wir nach weiteren Möglichkeiten zur Korrektur dieses Systems.

Dabei fanden wir, daß der Totraumfehler bei Ruheatmung (= Schwelle) zwar völlig durch Schwellenangleichung ausgeglichen wird, sich aber bei steigender Atemfrequenz bei Belastung wieder zunehmend einschleicht.

Deshalb schlagen wir als letzten Korrekturmodus beim offenen System die Korrektur des vermehrten Totraumfehlers in folgender Weise vor:

Während der Belastungsphase zeichnen wir die Frequenzsteigerung pro Minute der Belastung auf.

Die Summe der Frequenzsteigerung während der Belastungsphase wird nun mit dem Totraumvolumen des Fleisch'schen Pneumotachographen multipliziert und das so entstandene Produkt von dem bereits vorkorrigierten Wert des OS subtrahiert:

$$\text{OS: } 608,8 - 142 \times 0,14 = 588,8 = 103,2 \%$$

III. Zusammenfassung der Korrekturen (Chronologisch geordnet)

Die Aufstellung soll das Verhältnis von geschlossenem: offenem: ventilgesteuertem System nach den einzelnen Schritten der Korrektur zeigen:

1. Ohne Korrektur:	100	:	118	:	109
2. Schwellenkorrigiert:	100	:	106,6:		96,2
3. Korrektur der Zeitverspätung:	100	:	106,6:		100,7
4. Totraumkorrektur:	100	:	103,2:		100,7

IV. Steady state

Als kurze Randbemerkung sei hier noch erwähnt, daß das Erreichen eines Steady-state bei den einzelnen Belastungsstufen nach unserer Meinung recht gut am Einschwenken der Differenzquotientenkurven eines Systems auf die 100 %-Achse zu erkennen ist.

V. Schließlich soll als letzter Punkt der Diskussion noch die Frage geklärt werden, welche der drei Apparaturen in der Zeit unserer Versuche die stabilste Meßeinrichtung aufwies.

1. Wir glauben, den Vergleich von Vor- und Nachatmungsschwelle der drei Systeme als Kriterium für die Konstanterhaltung der Meßebene betrachten zu können.

Demzufolge ändert das geschlossene System seinen Wert von Vor- zur Nachatmung um 13,4 %, das offene System um 7,1 % und das ventilgesteuerte System um 0 %.

2. Ähnlich läßt sich die Veränderung der Meßebene durch den Vergleich der Meßreihen I und III darstellen. Beide Meßreihen sind in ihrer Leistungsauswahl und in ihrem sonstigen Versuchsaufbau (mit Ausnahme der fehlenden Vor- und Nachatmung bei Meßreihe I) als identisch zu betrachten. Der zeitliche Abstand der beiden Meßreihen beträgt ca. 8 Wochen.

Die Spitzenwerte zur 6. Minute der Belastungsstufe 150 Watt (nach ROSKAMM ist in diesem Belastungsbereich sogar eine annähernde Identität der verschiedenen Systeme zu erwarten) ändern sich innerhalb der Systeme jedoch wie folgt:

Meßreihe I		III		
GS:	39,8	---	45,9	= 15,8 %
OS:	44,8	---	46,3	= 3,3 %
VS:	44,2	---	44,6	= 0,1 %

Sowohl die Darstellung V.1 wie V.2 zeigen deutlich, daß das ventilgesteuerte System in jedem Falle die stabilsten Meßeinrichtungen besitzt, kurz gefolgt vom offenen System.

Die eindeutig größten Abweichungen innerhalb der eigenen Meßapparatur weist das von uns verwendete geschlossene System auf.

LITERATUR

ANTHONY, A. I. und VENRATH:
Funktionsprüfung der Atmung.
(Barth-Verlag) Leipzig 1962

BARTELS, H., E. BÜCHERL, C. W. HERTZ, R. RODEWALD und
M. SCHWAB:
Lungenfunktionsprüfungen
(Springer-Verlag) Berlin-Heidelberg-New York 1959

BÖHLAU, V.:
Prüfung der körperlichen Leistungsfähigkeit
(VEB G. Thieme) Leipzig 1956

BUCHHEIM, W.:
Persönliche Mitteilungen, Siemens A.G. Erlangen U.B.med.Abt.
EEP 2

COMROE, I. H., R. E. FORSTER, A. B. DUBOIS, W. A. BRISCOE
und E. CARLSEN:
Die Lunge
(Schattauer-Verlag) Stuttgart-New York 1968

FLEISCH, A.:
Le Pneumotachograph
Helvet. physiol. Acta 14, 363 (1956)

HANSEN, G.:
Atemzeitvolumen und Atemäquivalent bei ergometrischer
Leistung.
In: H. Mellerowicz und G. Hansen: I. Internationales Seminar
für Ergometrie, Berlin 1965, S. 203

HANSEN, G.:
Eine synoptische elektronische Anlage für die cardio-pulmonale
Funktionsdiagnostik
{SRW-Nachrichten 29, 14 (1966)

MELLEROWICZ, ROSKAMM, HETTINGER, HOLLMANN, KLAUS, KÖNIG, MIES,
REINDELL und STOBOY:

Vorschläge zur Standarisierung der ergometrischen Leistungs-
messung.

Zschr. Kreisf.-forsch. 53, 856 (1964)

ROSKAMM, H., H.-G. SCHOLZ, L. SAMEK, F. LANDRY und
H. NEIDEMANN:

Über die Genauigkeit der O_2 -Aufnahme und Atemminutenvolumen-
bestimmung in einem geschlossenen Spirometersystem.

Sportarzt und Sportmedizin 21, 57 (1970)

RUTENFRANZ, I.:

Zur Frage der Vergleichbarkeit von ergometrischen Methoden zur
Prüfung der körperlichen Leistungsfähigkeit.

Arbeitsmedizin 2, 93 (1967)

ULMER, W. T., REICHEL, G. und NOLTE, D.:

Die Lungenfunktion

(Thieme-Verlag) Stuttgart 1970

VALENTIN, H.:

Über Prüfstände und Meßplätze der Funktion von Herz-Kreislauf
und Lungen.

Medizinal Markt/Acta medicotechnica 11, 90 und 330 (1963)

VALENTIN, H., G. LEHNERT und H. I. WOITOWITZ:

Funktionsprüfungen von Herz, Kreislauf und Lungen in der
Arbeitsmedizin

Arbeitsmedizin 2, 49 (1964)

LEBENS LAUF

Am 11. März 1944 wurde ich, Hiltraud Rosenbauer, als 5. Kind des Notars Dr. Hermann Rosenbauer und seiner Ehefrau Gunda Irene Rosenbauer, geb. Balzer in Nürnberg geboren.

Im September 1950 kam ich in die Volksschule, seit Herbst 1954 besuchte ich das städtische Realgymnasium für Mädchen in Nürnberg.

Im Sommer 1964 erhielt ich an der Wilhelm-Löhe Schule in Nürnberg das Reifezeugnis.

Im Wintersemester 1964/65 begann ich an der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg mit dem Studium der Medizin. Das Vorphysikum bestand ich im Februar 1966. Seit dem Sommersemester 1966 studierte ich parallel als Zweitstudium Zahnheilkunde und legte nach dem Sommersemester 1967 das medizinische und zahnmedizinische Physikum ab. Nach dem Wintersemester 1969/70 begann ich mit dem Staatsexamen der Zahnheilkunde, das ich im Juli 1970 beendete.

Zum Doktor der Zahnmedizin promovierte ich am 30. Juli 1970. Im September 1970 begann ich mit dem medizinischen Staatsexamen, das ich am 19. Februar 1971 bestand.



Offsetdruck-Fotodruck

J. Hogl, 8520 Erlangen, Hauptstr. 109 (Nähe Martin-Luther-Platz) Tel. 22990
